

钢轨 ΔK_{th} 国标法与实测法对比分析

贾鹏霞, 李培德, 王 婷, 杨 静, 苏丽丽

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 钢轨经淬火后, 获得的硬化层硬度有硬度梯度, 通过国标法很难准确地计算出其疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。文章在 fatigue crack growth 软件的基础上, 通过软件优化解决门槛值 ΔK_{th} 的检测。对不同应力比下 U75V、U71Mn 淬火钢轨分别利用国标法和实测法获得门槛值 ΔK_{th} , 通过数据对比分析, 对于淬火钢轨使用实测法更能准确地确定其门槛值 ΔK_{th} 。

关键词: 钢轨; 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ; 疲劳裂纹扩展速率; 实测法

中图分类号: TG405

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)05-0088-06

Comparative Analysis on National Standard Method and Actual Measurement Method for ΔK_{th} of Rail

Jia Peng-xia, Li Pei-de, Wang Ting, Yang Jing, Su Li-li

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The hardness of hardened layer for rails after quenching is with hardness gradient and it is difficult to accurately calculate the threshold value ΔK_{th} of fatigue crack growth for rails. In the paper, the detection of threshold value ΔK_{th} is carried out through software optimization based on the fatigue crack growth software. The threshold values ΔK_{th} of U75V and U71Mn quenched rails with different stress ratios are obtained by national standard method and actual measurement method respectively. As a result, the threshold values ΔK_{th} of quenched rails obtained by actual measurement method are more accurate through comparative analysis of data.

Key words: rail; threshold value ΔK_{th} of fatigue crack growth; fatigue crack growth rate; actual measurement method

随着我国铁路重载、提速的迅猛发展, 钢轨的负担日益加重, 对钢轨的安全性提出更高要求。钢轨在使用过程中, 裂纹的出现是不可避免的, 因此, 用断裂力学研究裂纹的扩展特性。疲劳裂纹扩展门槛值(简称门槛值) ΔK_{th} 是钢轨损伤容限设计的一个重要参量, 随着科技的发展, 原先检测到 $da/dN = 10^{-8}$ mm/周次已经很困难, 现在通过柔度法和多周平均法可以检测更小的裂纹扩展速率 da/dN 。

目前工程中规定用 $da/dN = 10^{-7}$ mm/周次所对应的 ΔK 值作为门槛值, 称之为实用门槛值 ΔK_{th0} , 国标 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》^[1] 也采用了实用门槛值 ΔK_{th0} , 有试验发现, 当 $\Delta K \leq \Delta K_{th0}$ 时, 仍能观测到裂纹的明显扩展^[2]。在这样的情况下, 淬火钢轨硬化层存在硬度梯度, 国标法不能够准确的反映材料的门槛值, 因此, 找到一种较为可靠的确定真实门槛值的方

法显得非常重要。

1 试样

试样选择包钢轨梁厂生产的 60 kg/m 淬火轨

U75V 和 U71Mn, 严格按照 TB/T 2344—2020 《43 kg/m ~ 75 kg/m 热轧钢轨订货技术条件》^[3] 规定选取制样位置和试样尺寸。图 1 为疲劳裂纹扩展试样尺寸。

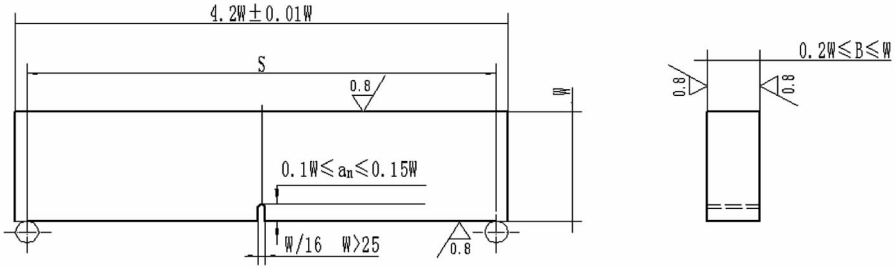


图 1 试样尺寸

2 疲劳裂纹扩展门槛值试验

按照 GB/T 6398—2000 要求, 首先对试验试样缺口进行线切割, 然后在 MTS810 上预制疲劳裂纹, 参数 K_{max} 选为 450 N/mm^{3/2}, 频率为 30 Hz, 预制长度为 0.1 B, B 代表试样的厚度。疲劳裂纹扩展试验采用降 K 法, 控制方式采用 ΔK 控制, 应力比 R 分别选 0.1、0.3、0.5、0.8。

3 国标法得到的门槛值 ΔK_{th} 结果

按照 GB/T 6398—2000 方法进行门槛值 ΔK_{th} 试验, 近门槛值附近的 da/dN 用割线法处理, 用表达式 $(da/dN)_i = (a_{i+1} - a_i) / (N_{i+1} - N_i)$ 算出各个编号的 da/dN 值。

对于三点弯曲试样, ΔK 的表达式如下:

$$\Delta K = \frac{\Delta P_{max}}{BW^{1/2}} \left[\frac{6\alpha^{1/2}}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \right] [1.99 -$$

$$\alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)] \quad (1)$$

式中: $\alpha = a/W$; B 代表试样的厚度; W 代表试样的宽度; ΔP_{max} 代表最大力的力值范围; a 代表计算裂纹长度; ΔK 代表应力强度因子范围。

da/dN 从 10⁻⁶ mm/周次到 10⁻⁷ mm/周次, 选取 $(da/dN)_i$ 和 ΔK_i 五组以上数据, 对组数据按 Paris 公式^[1]:

$$da/dN = C_1 (\Delta K)^{n_1} \quad (2)$$

两边取对数, 得到:

$$\lg(da/dN) = \lg C_1 + n_1 \lg(\Delta K) \quad (3)$$

以 $\lg(da/dN)$ 为自变量, 用线性回归法拟合曲线。求出 Paris 公式中常数 C_1 和 n_1 。取标准要求的 da/dN = 10⁻⁷ mm/周次为门槛值, 计算疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。本文给出了应力比为 0.5 的 U75V 淬火轨和应力比为 0.3 的 U71Mn 淬火轨门槛值测量数据统计和计算结果, 见表 1 和表 2。

表 1 U75V 淬火轨疲劳裂纹扩展门槛值测量数据统计和计算结果

Crack length/mm	Cycles/N	$\Delta K / (N \cdot mm^{-3/2})$	da/dN / (mm · cycles ⁻¹)	lg(ΔK)	lg(da/dN)
20.77	4 446 439	211.793	2.169 × 10 ⁻⁷	2.325 9	-6.663 7
20.63	3 385 636	213.123	2.326 × 10 ⁻⁷	2.328 6	-6.633 4
20.51	2 831 223	216.887	2.749 × 10 ⁻⁷	2.336 2	-6.560 8
20.43	2 473 434	219.126	3.213 × 10 ⁻⁷	2.340 7	-6.493 1
20.05	1 954 121	221.541	3.445 × 10 ⁻⁷	2.345 5	-6.462 8

由表1结果,对U75V淬火轨疲劳裂纹扩展门槛值测量数据用线性回归法拟合,得出计算 $\lg(da/dN)$ 的关系式如下:

$$R = 0.1 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 11.40\lg(\Delta K) - 33.19$$

$$R = 0.3 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 10.92\lg(\Delta K) - 32.06$$

$$R = 0.5 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 10.58\lg(\Delta K) - 31.28$$

$$R = 0.8 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 9.31\lg(\Delta K) - 28.34$$

表2 U71Mn 淬火轨疲劳裂纹扩展门槛值测量数据统计和计算结果

Crack length/mm	Cycles/N	$\Delta K / (N \cdot \text{mm}^{-3/2})$	$da/dN / (\text{mm} \cdot \text{cycles}^{-1})$	$\lg(\Delta K)$	$\lg(da/dN)$
24.16	3 724 188	208.59	2.109×10^{-7}	2.319 3	-6.675 9
24.22	4 357 721	207.02	1.878×10^{-7}	2.316 0	-6.726 3
24.41	5 802 580	204.91	1.641×10^{-7}	2.311 6	-6.784 9
24.48	6 282 581	202.55	1.534×10^{-7}	2.306 5	-6.814 2
24.56	7 061 981	200.16	1.395×10^{-7}	2.301 4	-6.855 4
24.61	8 399 830	199.45	1.301×10^{-7}	2.299 8	-6.885 7

由表2结果,对U71Mn淬火轨疲劳裂纹扩展门槛值测量数据用线性回归法拟合,得出计算 $\lg(da/dN)$ 的关系式如下:

$$R = 0.1 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 10.28\lg(\Delta K) - 30.49$$

$$R = 0.3 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 9.90\lg(\Delta K) - 29.69$$

$$R = 0.5 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 9.34\lg(\Delta K) - 28.35$$

$$R = 0.8 \text{ 时: } \lg(da/dN) = 8.61\lg(\Delta K) - 26.86$$

对U75V淬火轨和U71Mn淬火轨,分别选取 R 为0.1、0.3、0.5、0.8,测量疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,每个 R 值取两个试样,数据根据线性回归法拟合关系式计算,取其平均值,结果见表3。

表3 国标 GB/T 6398—2000 方法计算门槛值 ΔK_{th}

试样材质	编号	R	材料系数 n_1	$\lg C_1 / (m \cdot \text{cycle}^{-1})$	相关系数	n_1 平均值	$\lg C_1$ 平均值 $/(m \cdot \text{cycle}^{-1})$	ΔK_{th} 计算值 $/(N \cdot \text{mm}^{-3/2})$	ΔK_{th} 平均值 $/(N \cdot \text{mm}^{-3/2})$
U75V	1-1	0.1	11.423	-33.23	0.990 1	11.40	-33.19	219.12	218.00
	1-2		11.382	-33.15	0.989 2			216.89	
	1-3	0.3	10.928	-32.07	0.987 1	10.92	-32.06	213.13	215.34
	1-4		10.909	-32.04	0.991 3			217.54	
	1-5	0.5	10.584	-31.28	0.990 8	10.50	-31.12	214.04	212.96
	1-6		10.425	-30.97	0.980 8			211.89	
	1-7	0.8	9.328	-28.39	0.984 1	9.31	-28.34	212.22	210.79
	1-8		9.296	-28.29	0.981 0			209.36	
U71Mn	2-1	0.1	10.316	-30.54	0.990 8	10.28	-30.48	207.55	208.07
	2-2		10.241	-30.43	0.988 6			208.59	
	2-3	0.3	9.913	-29.68	0.991 2	9.91	-29.68	207.02	205.96
	2-4		9.908	-29.69	0.992 4			204.91	
	2-5	0.5	9.324	-28.32	0.991 7	9.34	-28.35	202.55	201.36
	2-6		9.351	-28.37	0.989 7			200.16	
	2-7	0.8	8.692	-26.88	0.989 3	8.61	-26.86	199.45	199.31
	2-8		8.531	-26.85	0.991 1			199.17	

国标法需要取 da/dN 从 10^{-6} mm/周次到 10^{-7} mm/周次的 $(da/dN)_i$ 和 ΔK_i 五组以上数据,对数组按 paris 公式计算,它属于一种估算疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,对轧制状态下没有硬度梯度的钢轨,非常实用,对有硬度梯度的淬火轨随着距离踏面深度的增加,裂纹形成难易情况也随着发生变化,很难真实反映淬火轨的门槛值。

4 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 试验实测法结果

严格按照 GB/T 6398—2000 门槛值 ΔK_{th} 试验要求,进行疲劳裂纹扩展速率试验,门槛值 ΔK_{th} 值直接从设置好的软件图表中读出,图2为软件显示结果。

Cycles	Crack Length(mm)	da/dN (mm/cycle)	Max Load (N)	Min Load (N)	Max Stress Intensity (N/mm ^{1.5})	Deltak Applied (N/mm ^{1.5})
7071555	21.0446	1.04130e.007	5721.70	2885.09	410.738	203.629
7072166	21.0510	1.04130e.007	5726.29	2869.23	411.246	205.186
7072758	21.0490	1.0000e.007	5703.11	2861.63	409.496	204.025
7073368	21.0329	1.0000e.007	5689.82	2830.38	408.130	205.107

图2 实测 ΔK_{th} 值显示结果

按照实测法,对 U75V 淬火轨和 U71Mn 淬火轨分别选取 R 为 0.1、0.3、0.5、0.8,测量疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,读出的门槛值 ΔK_{th} 见表4和表5。

表4 MTS 实测法 U75V 淬火轨门槛值 ΔK_{th}

编号	R	实测 ΔK_{th} /(N·mm ^{-3/2})	ΔK_{th} 平均值 /(N·mm ^{-3/2})
1-1	0.1	223.36	221.32
1-2		219.28	
1-3	0.3	218.41	219.31
1-4		220.21	
1-5	0.5	218.35	216.91
1-6		215.47	
1-7	0.8	213.81	214.72
1-8		215.64	

表5 MTS 实测法 U71Mn 淬火轨门槛值 ΔK_{th}

编号	R	实测 ΔK_{th} /(N·mm ^{-3/2})	ΔK_{th} 平均值 /(N·mm ^{-3/2})
2-1	0.1	211.52	210.82
2-2		210.13	
2-3	0.3	208.14	207.50
2-4		206.86	
2-5	0.5	205.59	204.74
2-6		203.89	
2-7	0.8	201.47	201.95
2-8		202.43	

实测法是通过软件实测疲劳裂纹扩展速率,直

到 da/dN 达到 10^{-7} mm/周次,选取对应的 ΔK 值作为钢轨的疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,反映的是真实检测到的疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,能准确的判断出材料的门槛值,对于淬火钢轨门槛值的测定,更有指导意义。

5 讨论分析

5.1 国标法与实测法 ΔK_{th} 对比

表6为分别取四组 U75V 淬火轨和 U71Mn 淬火轨试样,应力比分别选 0.1、0.3、0.5、0.8,运用国标法计算的门槛值 ΔK_{th} 和使用实测法测得的门槛值 ΔK_{th} 。

从表6不难看出,淬火轨通过国标法计算出的门槛值与实测值相差最高达 $3.97 \text{ N/mm}^{3/2}$ 。因为钢轨经淬火后,轨头受热和内部组织形态变化的不均匀,轨头温度分布不均匀,从而使淬火钢轨获得的硬化层硬度有硬度梯度。钢轨经淬火后珠光体细化,经过淬火处理的试样珠光体片层间距比轧态试样片层间距小^[4],片层间距小的珠光体片层会增加裂纹扩展的能量,从而使试样裂纹扩展更难。因此沿着硬度梯度方向裂纹形成的难易程度是不一样的,继续利用国标法来计算门槛值就会与实际门槛值出现较大的差值。轧态下的轨头没有硬度梯度,国标法和实测法 ΔK_{th} 接近,对于淬火轨在国标法求得的结果与实测法的值相差比较大,所以对于淬火轨实测

法更适合,更能反映出钢轨真实的门槛值。

表 6 国标法计算门槛值与实测法测定门槛值对比

试样材质	编号	R	国标法		实测法		国标法与 实测法差值 $/(N \cdot mm^{-3/2})$
			计算 ΔK_{th} $/(N \cdot mm^{-3/2})$	ΔK_{th} 平均值 $/(N \cdot mm^{-3/2})$	实测 ΔK_{th} $/(N \cdot mm^{-3/2})$	ΔK_{th} 平均 $/(N \cdot mm^{-3/2})$	
U75V	1-1	0.1	219.12	218.00	223.36	221.32	-3.32
	1-2		216.89		219.28		
	1-3	0.3	213.13		218.41	219.31	
	1-4		217.54		220.21		
	1-5	0.5	214.04		218.35	216.91	
	1-6		211.89		215.47		
	1-7	0.8	212.22		213.81	214.72	
	1-8		209.36		215.64		
U71Mn	2-1	0.1	207.55	208.07	211.52	210.82	-2.75
	2-2		208.59		210.13		
	2-3	0.3	207.02		208.14	207.50	
	2-4		204.91		206.86		
	2-5	0.5	202.55		205.59	204.74	
	2-6		200.16		203.89		
	2-7	0.8	199.45		201.47	201.95	
	2-8		199.17		202.43		

5.2 不同应力比的门槛值变化

图 3、图 4 为 U75V 淬火轨和 U71Mn 淬火轨不同应力比门槛值变化趋势图。

由图 3 和图 4 可以看出 U75V 和 U71Mn 淬火轨在不同应力比的门槛值变化趋势,随着应力比 R 的增加,疲劳裂纹扩展速率 da/dN 增加,疲劳裂纹扩展门槛值呈逐渐降低的趋势^[5]。

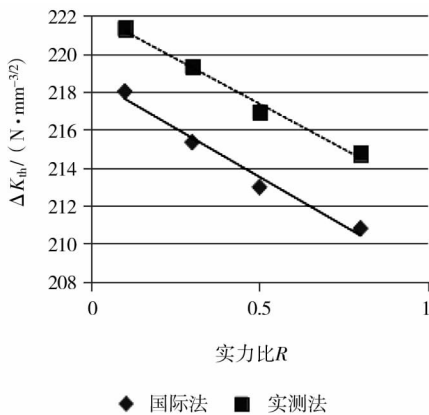


图 3 U75V 不同应力比门槛值变化趋势图

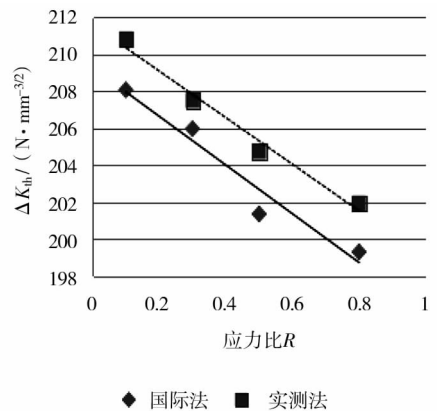


图 4 U71Mn 不同应力比门槛值变化趋势图

6 结论

(1) 钢轨经淬火后,获得的硬化层硬度有硬度梯度,通过国标法很难准确的计算出其疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,而实测法能真实反映轨头不同硬度值下的门槛值,所以实测法对淬火钢轨损伤容限设计更有指导意义。

(2) 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 随着应力比 R 增加, 门槛值 ΔK_{th} 变小。

参 考 文 献

[1] GB/T 6398—2000, 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S].
 [2] 王永廉. 对确定疲劳裂纹扩展理论门槛值方法的评介[J]. 南京工程学院学报, 2002, 2(1): 1-5.

[3] TB/T 2344—2020, 43 kg/m ~ 75 kg/m 热轧钢轨订货技术条件[S].
 [4] 周庆飞. 75 kg/m 重载用钢轨淬火工艺及疲劳裂纹扩展行为研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
 [5] 王博, 张骁勇, 马晶, 等. 一种 X80 管线钢焊接接头疲劳裂纹扩展门槛值的研究[J]. 焊管, 2014, 37(3): 8-13.

(上接第 49 页)

表 6 新旧成分系角裂率对比

钢种	优化前				优化后			
	检查块数 /块	边裂块数 /块	合格块数 /块	边裂发生率 /%	检查块数 /块	边裂块数 /块	合格块数 /块	边裂发生率 /%
Q235B(B155B)	100	27	73	27	100	0	100	0
Q235B(B155C)	100	23	77	23	100	0	100	0
合计	200	50	150	25	200	0	200	0

3 结 论

(1) 为了改善碳素结构钢 Q235B 铸坯角裂缺陷的频繁发生, 在设备工况不变的前提下, 通过优化产品成分设计, 铸坯角裂得到了根治, 一次合格率达到 100%, 提高了组产热装率和生产效率, 实现了产品的提质增效。

(2) 通过成分优化, 采用微合金化元素 Ti 的细晶强化和析出强化替代 C 元素的固溶强化, 产品各项性能均满足产品标准要求。整体比较, 采用新成分产品屈服强度呈现升高趋势, 抗拉强度呈下降趋势, 延伸率变化不明显, 冲击功提高。

参 考 文 献

[1] 葛紫薇, 张婧, 辛文彬, 等. Nb - V - Ti - N 微合金化结构钢中碳氮化物析出的热力学分析与实验研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(3): 57-64, 71.
 [2] 赵素, 张立, 徐国栋, 等. 微合金钢连铸坯角横裂的研究进展[J]. 世界钢铁, 2011, 11(1): 42-49.
 [3] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.